

КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ С МАРТЕНСИТО-БЕЙНИТНЫМ ПРЕВРАЩЕНИЕМ АУСТЕНИТА*

П.А. ПОПЕЛЮХ, аспирант

А.И. ПОПЕЛЮХ, канд. техн. наук, доцент

М.Р. ЮРКЕВИЧ, студентка

(НГТУ, г. Новосибирск)

Статья поступила 06 мая 2013 года

Попелюх А.И. - 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, e-mail: air13@mail.ru

Разработан новый способ комбинированной высокотемпературной термомеханической обработки стали 40Х2Н2МА со смешанным мартенсито-бейнитным превращением аустенита, обеспечивающий сочетание высоких показателей прочности, ударной вязкости и трещиностойкости. В результате термообработки в стали формируется мелкодисперсная структура, состоящая из 60 % нижнего бейнита и 40 % продуктов отпуска мартенсита. Предложенная термическая обработка по сравнению с традиционной технологией закалки с отпуском позволяет при сопоставимых показателях прочности обеспечить двукратное повышение ударной вязкости и трехкратное увеличение усталостных свойств стали 40Х2Н2МА.

Ключевые слова: термическая обработка, термомеханическая обработка, мартенсит, бейнит, ударные механизмы, надежность.

Введение

В строительной индустрии и добывающих отраслях промышленности получили широкое распространение машины ударного действия, обладающие высокой энергией ударного нагружения. Для их производства необходимо применять материалы, обладающие высокой прочностью и значительным сопротивлением усталостному разрушению при воздействии циклических ударных нагрузок [1]. В настоящее время для изготовления наиболее нагруженных деталей ударных машин используют среднеуглеродистые легированные стали, упрочненные закалкой с последующим отпуском. Однако такой вид термической обработки не позволяет обеспечить высокую надежность и долговечность ударных машин, ресурс работы которых обычно не превышает нескольких сотен часов машинного времени [2]. Проведенные ранее исследования по созданию в стали высокопрочной структуры, обладающей значительным сопротивлением усталостному разрушению, показали, что одной

из перспективных технологий является термическая обработка со смешанным мартенсито-бейнитным превращением аустенита [3]. Высокие механические свойства стали могут быть также обеспечены технологическими процессами, основанными на совмещении термического упрочнения и деформационного воздействия. Исследования, выполненные в научных коллективах М.Л. Бернштейна, Л.И. Тушинского и других ученых, свидетельствуют о том, что использование технологического процесса высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) позволяет увеличить прочностные характеристики высокопрочных среднелегированных сталей по сравнению с традиционным технологическим процессом закалки с отпуском на 200...300 МПа без уменьшения показателей пластичности, и повышает сопротивление стали усталостному разрушению в 1,5–2 раза [4, 5]. Деформация может осуществляться на различных стадиях нагрева и охлаждения, однако для упрочнения деталей ударных машин наиболее рациональным является способ, при котором

* Работа выполнена в рамках программы «Формирование государственных заданий высшим учебным заведениям на 2013 год и на плановый период 2014 и 2015 годов в части проведения научно-исследовательских работ». Регистрационный номер: 7.759.2011.

сталь деформируют в области существования стабильного аустенита. В этом случае высокотемпературная термомеханическая обработка может являться основой непрерывного высокопроизводительного технологического процесса производства деталей ударных машин, сочетающего операции формообразования и упрочнения. Применение данного технологического процесса повышает дисперсность формируемой структуры мартенсита или бейнита, уменьшает пересыщенность α -твердого раствора углеродом, что в конечном итоге обеспечивает высокую способность стали к релаксации локальных напряжений и значительное сопротивление разрушению с гарантированно высокими показателями прочности и ударной вязкости.

Цель исследования заключалась в разработке технологии, сочетающей пластическую деформацию в горячем состоянии с получением в стали смешанной высокопрочной мартенсито-бейнитной структуры, которая позволит достичь высоких показателей конструктивной прочности в условиях циклического ударного нагружения.

1. Материалы и методы исследования

Суть термомеханической обработки со смешанным мартенсито-бейнитным превращением аустенита (ВТММБ), разработанной на кафедре

материаловедения в машиностроении НГТУ, заключается в следующем. Стальные заготовки нагревают до температуры аустенизации и деформируют, в результате чего в стали формируется структура мелкозернистого аустенита (рис. 1). После деформации заготовки охлаждают с высокой скоростью в расплаве селитры до температуры T_n , находящейся между температурами начала и окончания мартенситного превращения. В условиях переохлаждения происходит частичный распад аустенита с образованием в стали определенного количества мартенсита. Финальная стадия термической обработки заключается в нагреве заготовки до температуры промежуточного превращения $T_{из}$, при которой оставшийся аустенит превращается в структуру нижнего бейнита, а образовавшийся ранее мартенсит отпускается. Принципиальное отличие разработанной технологии высокотемпературной термомеханической обработки со смешанным мартенсито-бейнитным превращением аустенита (ВТММБ) от известных технологических процессов высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО) (рис. 1, б) и термомеханической изотермической обработки с бейнитным превращением переохлажденного аустенита (ВТМИЗО) заключается в том, что в стали формируется мелкодисперсная смешанная структура, состоящая из нижнего бейнита и продуктов отпуска мартенсита.

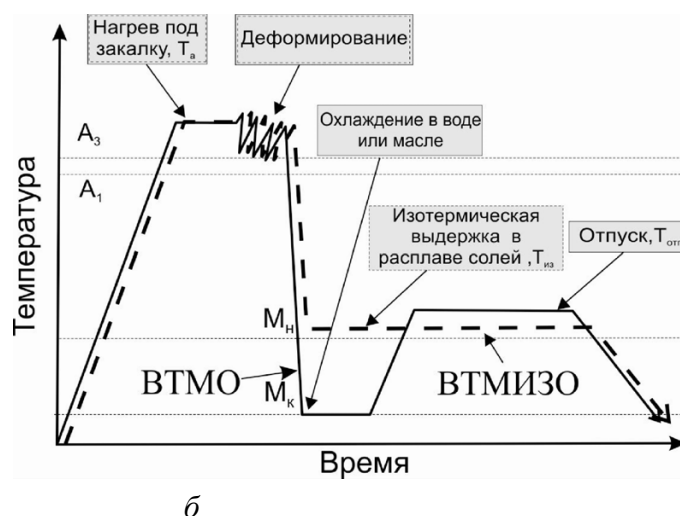
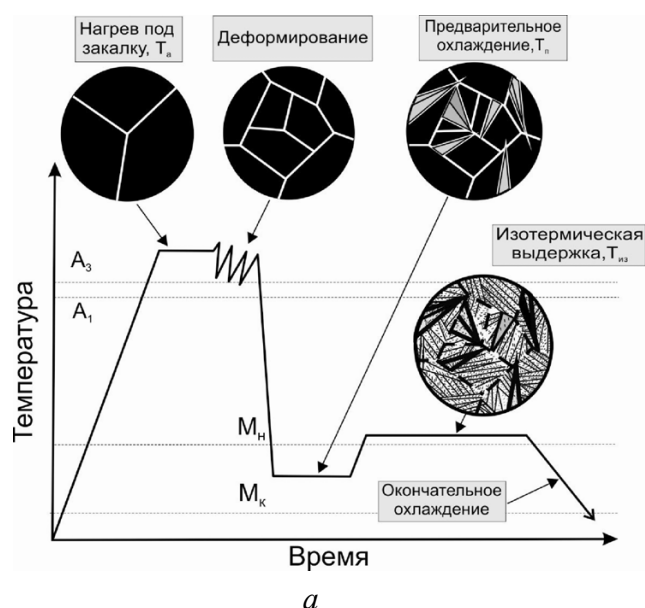


Рис. 1. Схема высокотемпературной термомеханической обработки со смешанным мартенсито-бейнитным превращением аустенита ВТММБ (а), высокотемпературной термомеханической обработки ВТМО и термомеханической изотермической обработки с бейнитным превращением переохлажденного аустенита ВТМИЗО (б)

Предлагаемая обработка имеет ряд достоинств. Горячая деформация приводит к измельчению зерен аустенита, способствует формированию при охлаждении развитой субструктуры α -твердого раствора и измельчению пластин мартенсита и бейнита. При ВТММБ-обработке мартенситное превращение характеризуется своей незавершенностью. Мартенситные кристаллы окружены аустенитом, обеспечивающим релаксацию внутренних напряжений в стали. Кроме того, мартенсит преимущественно образуется в микрообъемах, обедненных углеродом и обладающих повышенной температурой начала мартенситного превращения M_n , что способствует образованию в структуре стали реечного мартенсита, характеризующегося по сравнению с двойникованным повышенной вязкостью разрушения.

В качестве материала для исследования была использована высококачественная среднеуглеродистая легированная сталь марки 40X2H2MA, которая широко используется для изготовления наиболее ответственных деталей ударных машин. Высокотемпературную термомеханическую обработку стали 40X2H2MA с мартенситобейнитным превращением аустенита (ВТММБ) проводили по следующим режимам. Заготовки из стали размером 20×50×7 мм нагревали до температуры 910 °С и выдерживали при этой температуре в течение 20 минут. Затем производили прокатку заготовок с деформацией 40 % с последующим ускоренным охлаждением в расплаве солей при температуре 270 °С в течение 5 минут. Дальнейшую изотермическую выдержку производили в камерной печи при температуре 350 °С. Окончательное охлаждение заготовок осуществляли на спокойном воздухе. Режим деформирования стали был выбран на основании результатов научных исследований технологии регулируемого термопластического упрочнения, длительное время проводимых под руководством Л.И. Тушинского на кафедре материаловедения в машиностроении НГТУ [5]. Деформация со степенью 40 % обеспечивает эффективное измельчение структуры аустенита и формирование мелкодисперсной структуры с высоким уровнем механических свойств. Температуры предварительного охлаждения 270 °С и изотермического превращения с распадом в бейнитной области 350 °С были выбраны в соответствии с резуль-

татами научных исследований [3]. При данных режимах в стали формируется структура с объемными долями мартенсита и бейнита 40 и 60 % соответственно, что обеспечивает сочетание высоких прочностных характеристик со значительными показателями сопротивления усталостному разрушению.

Эффективность предлагаемого способа термической обработки оценивалась путем сравнения со свойствами стали после закалки и отпуска, изотермической закалки, высокотемпературной термомеханической обработки с бейнитным превращением (ВТМИЗО) и технологии высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО). Все вышеуказанные технологические процессы обеспечивали формирование в стали структуры твердостью HRC 36-46, которая, по литературным данным, обеспечивает наивысшие показатели сопротивления усталостному разрушению.

Закалку с отпуском проводили по следующим режимам: нагрев до 870 °С с выдержкой при этой температуре в течение 20 минут, охлаждение в масле и отпуск в камерной печи в течение одного часа при температуре 400 °С. Изотермическую обработку с распадом аустенита в бейнитной области выполняли следующим образом: нагрев до 870 °С с выдержкой при этой температуре в течение 20 минут, охлаждение в расплаве солей при температуре 350 °С с выдержкой в течение одного часа. Технологический процесс ВТМИЗО проводили по следующей схеме: нагрев стали до 910 °С с выдержкой при этой температуре в течение 20 минут, прокатка со степенью деформации 40 %, охлаждение и изотермическая выдержка в расплаве солей при температуре 350 °С в течение одного часа. Обработку ВТМО осуществляли по следующим режимам: нагрев стали до 910 °С, выдержка при этой температуре в течение 20 минут, прокатка со степенью деформации 40 %, быстрое охлаждение в масле и последующий отпуск в камерной печи при температуре 400 °С в течение одного часа.

В качестве критериев для сравнения эффективности различных видов термической и термомеханической обработки стали использовали твердость по Роквеллу, механические свойства при испытаниях на растяжение, ударный изгиб и усталость. Определение прочностных характеристик материалов при статических испыта-

ниях на растяжение проводили на универсальной сервогидравлической системе Instron 3369. Использовали плоские пропорциональные образцы XIII типа. Испытания на ударный изгиб проводили на маятниковом копре Instron 9050 на образцах 14 типа V образным надрезом. Оценку сопротивления усталостному разрушению проводили на испытательном комплексе Instron 8801. Плоские образцы размером $3,4 \times 20 \times 100$ с концентратором напряжения испытывали по схеме растяжения-сжатия с частотой 5 Гц. Амплитуда нагрузки составляла $\pm 17,5$ кН. При проведении испытаний фиксировали время зарождения и распространения в образцах усталостных трещин, а также использовали метод оценки трещиностойкости материалов, основанный на построении и анализе кинетических диаграмм усталостного разрушения (КДУР). Механические свойства рассчитывали по результатам испытаний серии из трех образцов. Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе Carl Zeiss AxioObserver A1m при увеличении от 25 до 1000 крат. Фрактографические исследования разрушенных образцов осуществляли на растровом электронном микроскопе Zeiss EVO 50 XVP.

2. Результаты экспериментов и их обсуждение

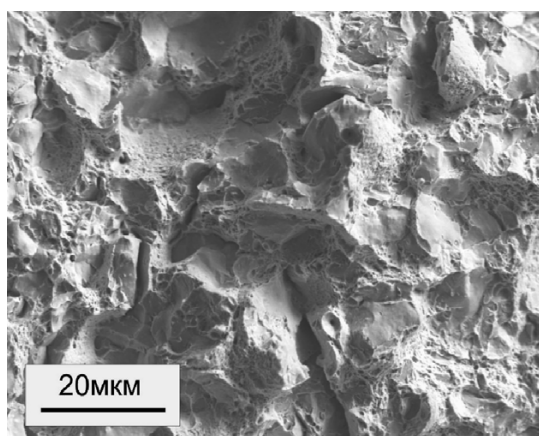
Результаты статических испытаний на растяжение показывают, что высокие прочностные характеристики стали могут быть обеспечены различными видами обработки, основанными на получении структуры мартенсита (см. таблицу). Это технологические процессы закалки с отпуском, высокотемпературной термомеханической

обработки (ВТМО) и высокотемпературной термомеханической обработки с мартенсито-бейнитным превращением аустенита (ВТММБ). Технологии ИЗО или ВТМИЗО, при которых в стали формируется структура нижнего бейнита различной дисперсности, обеспечивают показатели условного предела текучести и временного сопротивления стали на 400...500 МПа меньше, чем традиционный технологический процесс закалки с отпуском (при сопоставимых температурах изотермического превращения и отпуска). Технологические процессы, в которых используется горячая пластическая деформация аустенита, обеспечивают 10...15 %-е увеличение прочности стали при одновременном 10...20 %-м росте показателей ударной вязкости и усталостной долговечности по сравнению с аналогичными технологиями без этой операции.

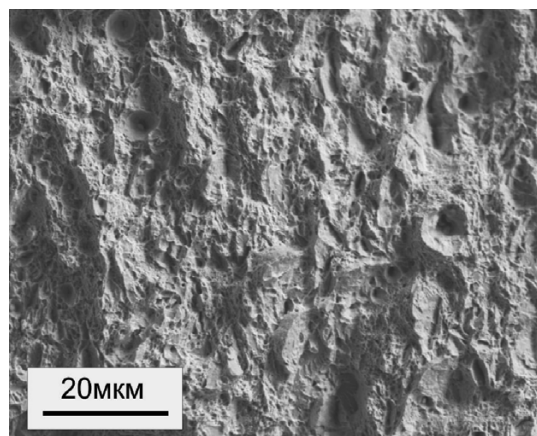
Фрактографические исследования образцов после испытаний на ударный изгиб показали, что закаленная и отпущенная сталь имеет смешанный излом с локализованными участками хрупкого и вязкого разрушения приблизительно равной площади (рис. 2, а). Анализ поверхности разрушения образцов, упрочненных по технологии ВТМО, показывает, что пластическая деформация стали в горячем состоянии приводит к увеличению доли вязкой составляющей и, как следствие, росту вязкости разрушения. Площадь участков, на которых разрушение происходит хрупко, составляет 10...15 % от общей площади поверхности разрушения (рис. 2, б). Разрушение образцов, упрочненных по технологии ВТМИЗО или изотермической закалки с распадом аустенита в бейнитной области, происходит преимущественно по механизму хрупкого квазискола с образованием на поверхности разрушения мел-

Механические свойства стали 40X2H2MA после различных видов термического упрочнения

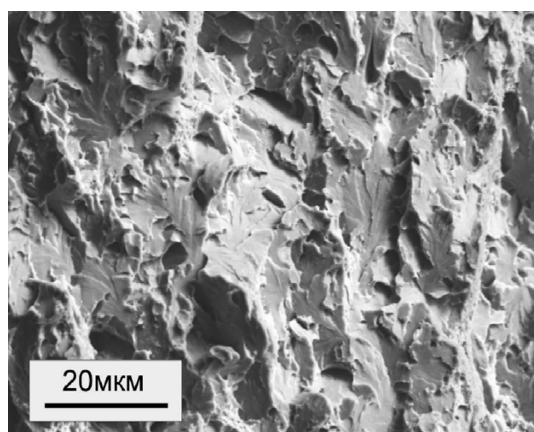
Способ термического упрочнения	HRC	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	KCV, Дж/см ²	Долговечность, цикл
Закалка с отпуском, $T_{отп} = 400$ °C	45	1267	1484	46	31920
Изотермическая закалка, $T_{из} = 350$ °C	35	750	1080	42	45390
ВТМИЗО	37	876	1094	45	50190
ВТМО	46	1446	1483	59,7	33000
ВТММБ	47	1439	1597	96,6	67320



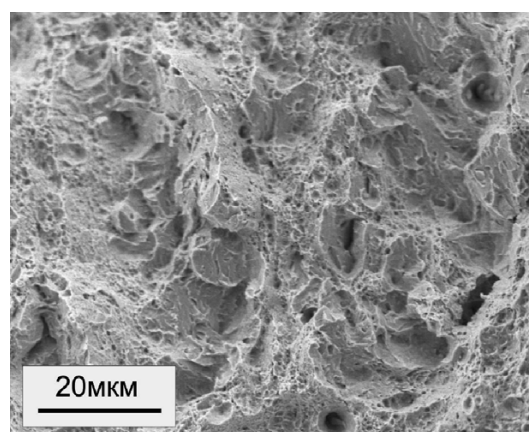
a



б



в



г

Рис. 2. Поверхность разрушения образцов после испытаний на ударный изгиб:

a – закалка + отпуск при 400 °С; *б* – обработка по технологии ВТМО;
в – обработка по технологии ВТМИЗО; *г* – обработка по технологии ВТММБ

ких фасеток со слабо выраженными следами пластической деформации (рис. 2, *в*). Сталь после комбинированной термической обработки со смешанным мартенсито-бейнитным превращением аустенита (ВТММБ) разрушается преимущественно вязко с незначительным количеством участков хрупкого разрушения (рис. 2, *г*). Поверхность излома имеет развитый рельеф, что может быть объяснено тем, что трещина часто меняет свое направление. Распространение трещины, как правило, совпадает с границами областей отпущенного мартенсита и нижнего бейнита. Частая переориентация трещины увеличивает энергоемкость процесса разрушения и соответственно сопротивление стали разрушению в условиях динамического изгиба.

Одним из важнейших показателей конструктивной прочности деталей ударных машин является их сопротивление усталостному разрушению. Оценку эффективности различных

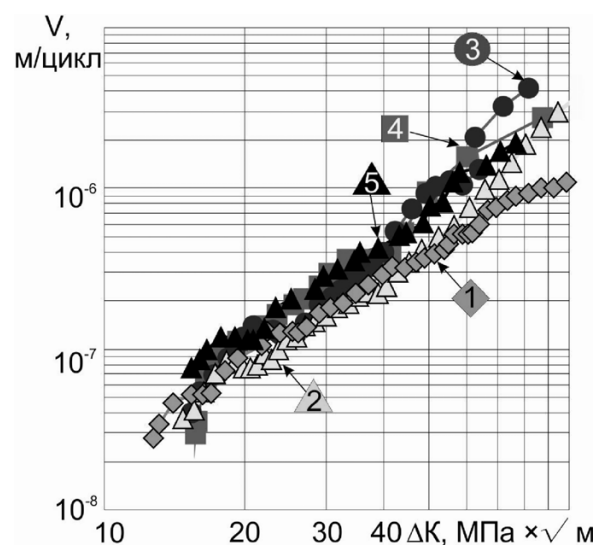


Рис. 3. Кинетические диаграммы усталостного разрушения стали, после различных видов упрочнения:

1 – ВТММБ; 2 – ВТМИЗО; 3 – изотермическая закалка при 350 °С; 4 – закалка + отпуск 400 °С; 5 – ВТМО

способов термической обработки осуществляли путем сравнения показателей циклической долговечности и скорости роста усталостной трещины на втором (линейном) участке кинетической диаграммы усталостного разрушения. Установлено, что высокотемпературная пластическая деформация увеличивает сопротивление зарождению и распространению усталостных трещин. Наилучшими свойствами обладают образцы, упрочненные по технологии ВТММБ (рис. 3). Скорость роста усталостных трещин в них в 2-3 раза ниже, а общая долговечность более чем в два раза выше по сравнению с образцами из стали 40Х2Н2МА, упрочненными традиционной технологией закалки с отпуском. Значительным сопротивлением распространению усталостных трещин обладает также сталь, обработанная по технологии изотермической закалки или ВТМИЗО. Однако использование технологического процесса ВТМИЗО не обеспечивает высоких показателей прочности и твердости стали.

Выводы

Высокотемпературная термомеханическая обработка с мартенсито-бейнитным превращением аустенита (ВТММБ) является эффективным способом упрочнения, позволяющим обеспечить высокую прочность и трещиностойкость стали. Сталь 40Х2Н2МА, обработанная по технологии ВТММБ, при сопоставимых показателях прочности имеет в три раза выше усталостные свойства по сравнению с закаленной и отпущенной

сталью и в полтора раза выше по сравнению со сталью, упрочненной по известным технологиям ВТМО и ВТМИЗО. Технологический процесс высокотемпературной термомеханической обработки со смешанным мартенсито-бейнитным превращением аустенита может быть применен при прокатке заготовок бурового инструмента или штамповке малогабаритных деталей ударных машин, например, ударников отбойных молотков и перфораторов.

Список литературы

1. Червов В.В. Перспективы совершенствования пневмоударных машин для строительных технологий. «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды». Труды конференции с участием зарубежных ученых (28 июня–2 июля 2010). ТПИ. Машиноведение. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2010. – С. 59–65.
2. Иванов К.И. Латышев В.А. Андреев В.Д. Техника бурения при разработке месторождений полезных ископаемых. – М.: Недра, 1987. – 272 с.
3. Попелюх А.И., Батаев А.А., Теплых А.М., Огнев А.Ю., Головин Е.Д. Способ термической обработки инструментальной стали со смешанным мартенситно-бейнитным превращением аустенита // Сталь. – 2011. – № 4. – С. 69–73.
4. М.Л. Бернштейн, В.А. Займовский, Л.М. Капуткина. Термомеханическая обработка стали. – М.: Металлургия, 1983. – 480 с.
5. Тушинский Л.И. Теория и технология упрочнения металлических сплавов / отв. ред. Е.И. Шемякин; Акад. наук СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела. – Новосибирск: Наука, 1990. – 303 с.

Combined thermomechanical treatment of steel with martensite-bainite transformation of austenite

P.A. Popelyukh, A.I. Popelyukh, M.R. Yurkevich

Novosibirsk State Technical University, Karl Marx avenue, 20,
Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Abstract

A new method for thermo-mechanical treatment of steel 40H2N2MA concerned mixed martensite-bainite transformation of austenite is developed. The thermo-mechanical processing includes hot deformation and rapid cooling down to the temperature in the range between the beginning and finishing of martensitic transformation accompanying with 40% martensite formation. The final stage of heat treatment is to heat up to the temperature of bainite transformation in which the remaining austenite transforms into the structure of bainite and previously formed martensite tempers. The superfine steel structure consists of 60 % bainite and 40% the tempered martensite

is obtained. In comparison with well known techniques of thermal treatment, the developed thermo-mechanical treatment increases the impact toughness of the steel 40H2N2MA up to 1.3 - 2 times and fatigue crack resistance up to 1.5 - 3 times (at equal values of strength parameters). The technological process of high-temperature thermo-mechanical treatment with mixed martensitic-bainitic transformation of austenite is recommended for treatment of rolling billets, drilling tools or small parts of stamping impact machines.

Keywords: thermal treatment, thermo mechanical treatment, martensite, bainite, impact machines, reliability.

References

1. Chervov V.V. *Perspektivy sovershenstvovaniya pnevmoudarnyh mashin dlja stroitel'nyh tehnologij* (Prospects for improving pneumatic percussive machines for building technologies.) "Fundamental problems of technogenic geoenvironment formation." Proceedings of the conference with foreign participants (June 28-July 2, 2010). Vol.III, Mashinovedenie, Novosibirsk, Institute of Mining of SB RAS, 2010, pp. 59-65.
2. Ivanov K.I. Latyshev V.A. Andreev V.D. *Tehnika burenija pri razrabotke mestorozhdenij poleznyh iskopajemyh* (Drilling technique in the development of mineral deposits). Moscow, Nedra, 1987. 272 p.
3. Popelyukh P.A., Bataev A.A., Teplyh A.M., Ognev A.Yu., Golovin E.D. *Stal'*, 2011, no. 4, pp. 69-73.
4. Bernshtejn M.L., Zajmovskij V.A., Kaputkina L.M. *Termomehanicheskaja obrabotka stali* (Thermomechanical processing of steel). Moscow, Metallurgija, 1983. 480 p.
5. Tushinskij L.I. *Teorija i tehnologija uprochnenija metallicheskih splavov* (Theory and technology of hardening of metal alloys). USSR Academy of Sciences, Siberian Branch, Institute of Mining, Novosibirsk, Nauka, 1990. 303 p.